

鋼補剛木歩道橋の固有振動数解析

Eigenvalue analysis of pedestrian bridge composed of hybrid timber and steel girder

(株)日本製鋼所 室蘭研究所	○ 正員 奥野 寛人 (Hiroto Okuno)
室蘭工業大学	フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学	正員 小室 雅人 (Masato Komuro)
(株)KGE	正員 巽 治 (Osamu Tatsumi)
室蘭市 都市建設部土木課	三上 俊一 (Syun-ichi Mikami)

1. はじめに

八丁平つなぎ橋（以後、単につなぎ橋と称す）は、平成14年4月に室蘭市に建設された3径間鋼補剛木桁橋である。本橋梁は橋長70.0m、総幅員3.8mの歩道橋で、主要部材に集成材と鋼板を用いたハイブリッド橋梁である。主桁部には曲げ剛性を向上させるために鋼で補剛した集成材を、床版には鋼床版を用いている。本構造形式の橋梁としては、車道橋である秋田県の坊中橋¹⁾があるものの北海道における採用は本橋梁がはじめてである。橋長に関しては、本橋梁は坊中橋の55mを凌ぎ、鋼・集成材ハイブリッド木橋の中では日本最長となっている。しかしながら、この種の歩道橋に関する振動特性は評価されるに至っていない。

このような観点から、鋼補剛木歩道橋であるつなぎ橋の完成後の自由振動特性を把握することを目的に、人力による加振実験²⁾が別途実施された。本論文では、今後の維持管理の観点から有限要素法による固有振動解析を行い、加振実験結果と比較することにより、解析結果の妥当性を検討した。

2. つなぎ橋の概要

つなぎ橋は室蘭市市道の中島港北通線を跨ぎ、八丁平4丁目と5丁目を結ぶ歩道橋である。本橋梁は集成材と鋼板とのハイブリッド構造を採用している。集成材には品質等級が対称異等級構成集成材（から松、E105-F300）を、主要鋼材には、メンテナンスを考慮し耐候性鋼材（SMA400W）を使用している。主桁には大断面集成材を使用し、集成材の上部に鋼床版の仕口板を、下部に補剛鋼板をそれぞれ表面ブラスト処理した後挿入し、エポキシ樹脂接着剤を用いて接合している。また、床版にはコ

ンクリート床版に比較して軽量の鋼床版を採用しているため、上部工の死荷重を軽減させるとともに、降雪や雨水から主要部材である集成材を保護している。

本橋梁は集成材が木材面として露出するため周辺景観との調和が図れ、鋼材で補強することにより長支間を可能にしている。さらに循環資源である木材を使用しているため、リサイクルが可能な橋梁である。図-1および写真-1につなぎ橋の一般図と全景をそれぞれ示している。なお、本橋梁の橋面舗装には廃タイヤリサイクルゴムチップからなるゴム舗装を採用している。以下につなぎ橋の諸元を示す。

規格	: 歩道橋
橋長	: 70 m
支間	: 19 m + 27 m + 23 m
幅員	: 歩道 3.0 m + 地覆 2 × 0.4 m
形式	: 3径間連続鋼床版鋼補剛木橋
支承	: ゴム製沓
集成材	: から松, E105-F300
鋼材	: SMA400AW他

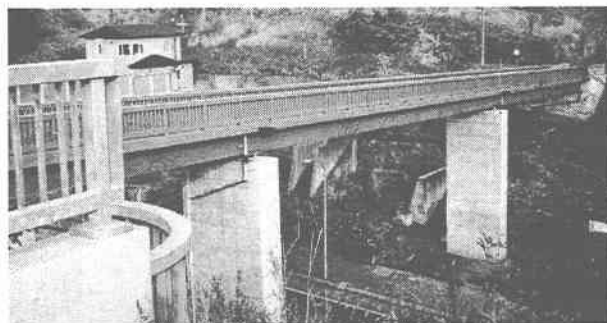


写真-1 つなぎ橋の全景

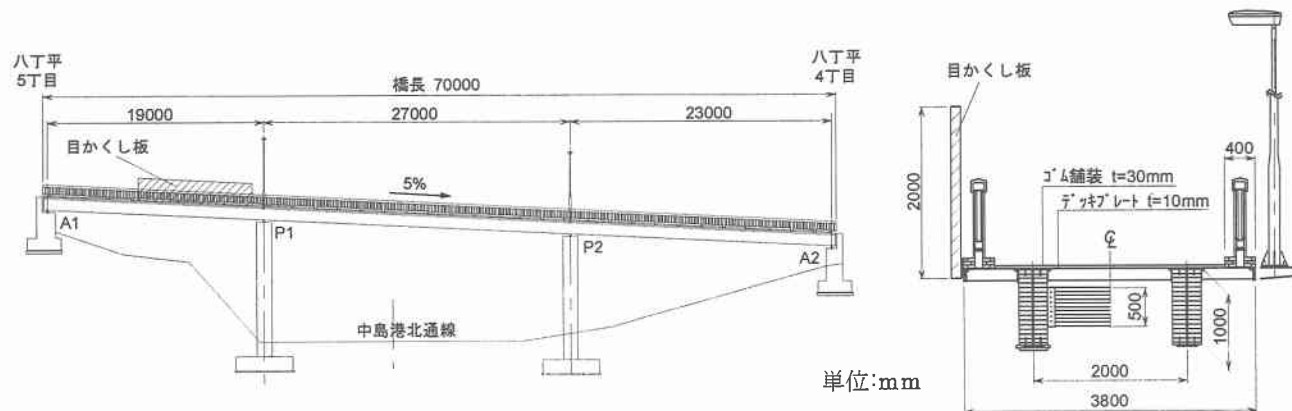
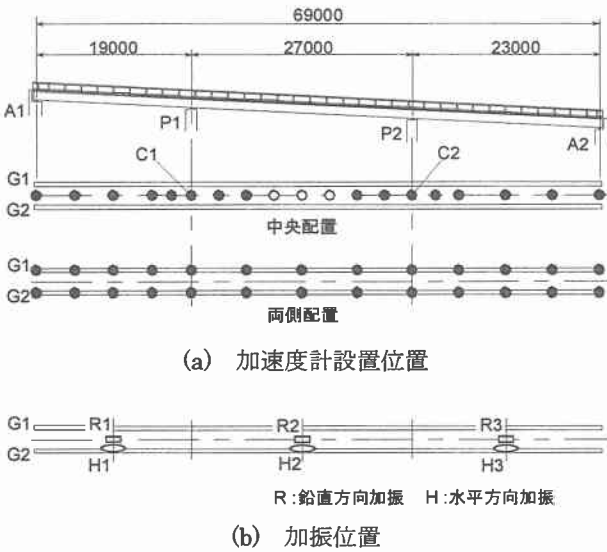


図-1 つなぎ橋の一般図

3. 加振実験概要

本橋梁の完成後の振動特性を確認するために、人力による加振実験が別途実施された。一般的に橋梁の振動特性を評価するための加振実験には、起振機が用いられる。しかしながら、歩道橋のように橋梁の規模が小さく、主桁の剛性が比較的小さい橋梁の場合には、人力による加振でも十分な振動を励起することが可能である。

図－2に加速度計の配置位置および加振位置を示している。本実験では、本橋梁の固有振動特性を精度良く計測するために、サーボ型加速度計（容量：9.8 m/s²あるいは19.6 m/s²、周波数特性：DC～100 Hz）を全スパンに渡って設置している。すなわち、鉛直方向振動成分観測時には、曲げ振動成分に着目して断面中央部に19 chを、またねじり振動および水平振動成分観測時には断面両端



図－2 加速度計配置と加振位置

部に26 ch配置している。また、同図には人力による加振位置を示している。図中のR1、R2そしてR3では中央径間で1人の人間が椅子から飛び降りることにより鉛直振動成分を、H1、H2そしてH3では3人の人間が斜め腕立て伏せにより高欄部を加振することによって水平振動成分を励起させている。計測およびデータの記録に関しては、加速度計からの出力波形を200 Hzのサンプリング周波数でメモリーレコーダアナライザーにて一括収録している。なお、鉛直振動成分観測時には、断面中央部の3つの加速度計（図－2における○印）に不具合が生じたため、加速度波形の収録ができなかった。

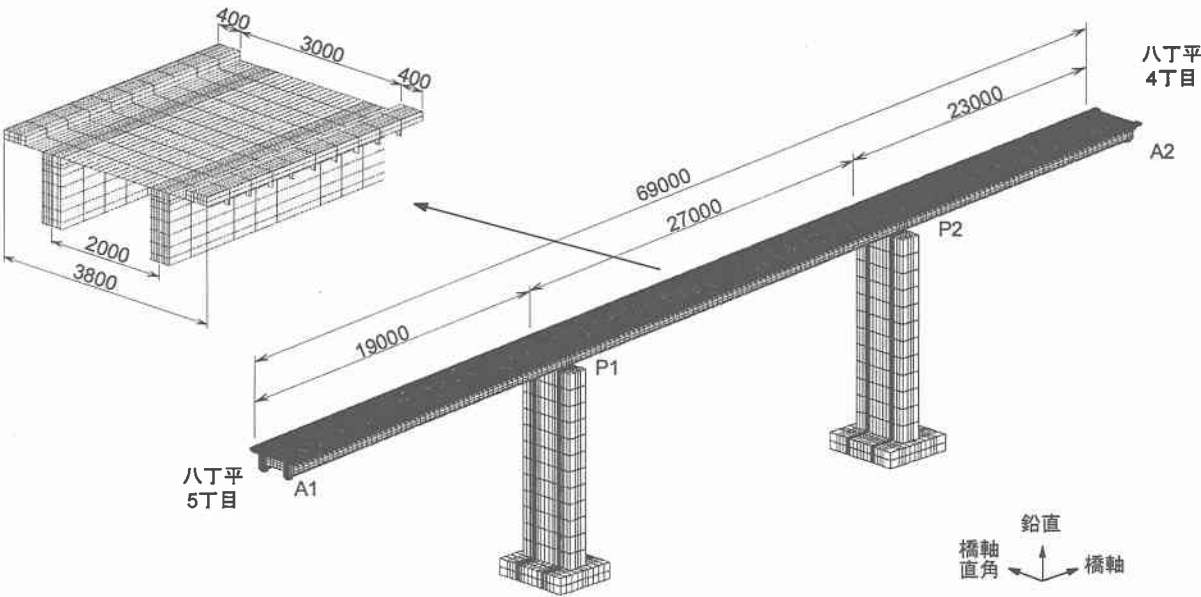
4. 有限要素法を用いた固有振動数解析

4.1 解析モデル

図－3に解析モデルの要素分割図を示す。総要素数および総節点数は、75,460、64,608である。本解析では、できるだけ忠実なモデルを用いて振動特性を評価するために、橋脚を含めた全体系を解析対象とした。地覆部、主

表－1 ゴム支承の諸元

物性値		支点部			
		A1	A2	P1	P2
寸法	橋軸方向 (mm)	330	460		
	橋軸直角方向 (mm)	250	300		
	高さ (mm)	137	121		
支承全体の高さ (mm)		237	225		
一層のゴムの厚さ (mm)		11	14		
層数		6	4		
ゴムのせん断弾性率 (kN/m ²)		800	1000		
鋼板の種類		SS400	SS400		
鋼板1枚の厚さ (mm)		3	3		
ゴム支承の水平剛性 (kN/m)		864	2200		



図－3 要素分割図

桁部（集成材）および橋脚に 8 節点固体要素を、主桁部の鋼板、横桁、縦リブおよび鋼床版に 4 節点シェル要素を用いてモデル化している。表－1 には、本橋梁に用いられている支承（積層ゴム支承、NR + SM490A + SS400）の諸元を示している。本解析では、計算の簡略化のため支承をゴム部と鋼板部に分割し、それぞれを 8 節点固体要素を用いてモデル化している。高欄部は計算の簡略化を図るため、地覆端部に 4 節点シェル要素を用いてモデル化し、実構造物に対応する質量を等価に与えている。また、ゴム舗装に関しては、鋼床版上に 4 節点シェル要素を用いてモデル化し、質量のみ与えている。なお、本解析では目かくし板、照明灯そして橋台は省略している。

4.2 材料定数

表－2 に解析に用いた材料定数をまとめて示す。鋼材の材料定数には公称値を用いている。橋脚の鉄筋コンクリートの材料定数には、設計基準強度から道路橋示方書 IV 下部構造編³⁾を基に算出した値を採用している。集成材に関しては、含水率条件、使用される木材の個体差によって質量や体積が変動することから、密度を正確に決定することが困難である。そこで、本解析では、本橋梁に用いられている同一規格の集成材から数個の試験体採取し、その試験体を用いて室温における寸法および質量の測定し、密度を決定した。なお、集成材の弾性係数には規格値を用いている。支承に用いられているゴムの物性値は、非圧縮性を考慮しポアソン比 $\nu = 0.49$ を、弾性係数 E_m （縦弾性係数）に関しては、せん断弾性率（表－1 参照）およびポアソン比から算出した値 2.31 MPa を採用している。なお、本解析では、ゴム支承の剛性特性が外力条件に大きく影響することから、加振実験結果を踏まえ弾性係数 E_m を 1、50、100、200 倍と変化させて解析を試みた。

4.3 拘束条件

拘束条件は、端支点においてはゴム支承下面、中央支点においては橋脚下面に相当する節点を拘束することとした。したがって、それらの節点は橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直方向には固定状態となっている。

固有振動数解析は、弾塑性構造解析用汎用プログラムである ABAQUS を用いることとし、弾性解析に基づいて実施した。なお、固有値抽出の解法には、サブスペースイテレーション法を採用している。

表－2 材料定数一覧

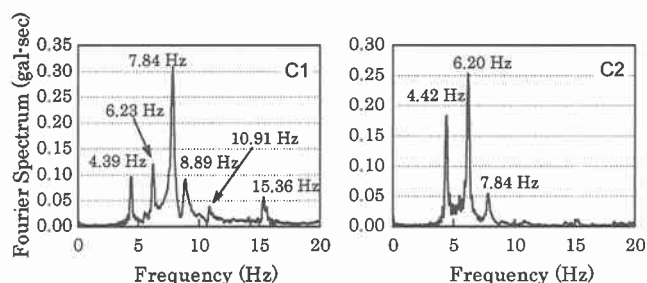
	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	単位体積質量 ρ (kg/m ³)
集成材	10.3	0.4	620
鋼材	206	0.3	7850
コンクリート	30	0.2	2500
支承(ゴム部)	2.31×10^{-3} *	0.49	1000

* ゴム部の弾性係数を 1 倍、50 倍、100 倍、200 倍と変化させて解析を実施している。

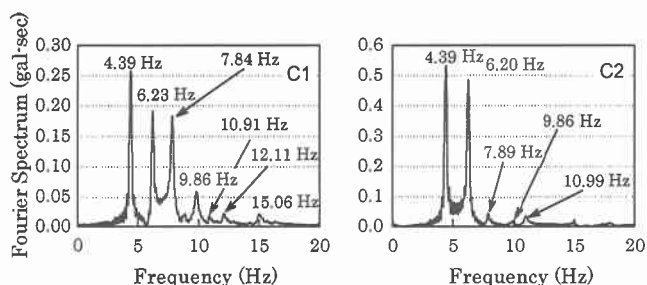
5. 実験結果および解析結果

図－4 には、それぞれ R1 および R2 加振時における側点 C1 と C2 の鉛直方向加速度波形から得られるフーリエスペクトルを示している。また、表－3 には、実験結果とゴム支承部の弾性係数 E_m を変化させた場合における解析結果を比較して示している。なお、実験結果における水平振動およびねじり振動に関しては、明確な振動モードの特定が困難であったため固有振動数の抽出は不可能であった。表より曲げ振動数に着目すると、1 次振動数はゴム支承の E_m の増加に伴って大きくなる傾向が見られ、 E_m を 100 倍とすることにより、実験結果とほぼ一致することがわかる。これは、人力加振時の加振エネルギーが小さいため、ゴム支承の変形量も小さく初期弾性係数領域での振動状態であることを示唆している。高次振動に関しては、いずれの弾性係数を用いた場合でも実験結果と比較して若干の差異が見られる。ねじり振動数に関しては、 E_m を 100 倍とした場合、ねじり 1 次振動数が 5.82 Hz と曲げ 2 次振動数と非常に近い値となることがわかる。実験において、ねじり振動の振動モードの特定が困難であった原因として、1) 幅員が桁長に比較して小さいためねじり振動モードが十分に卓越する加振が困難であったこと、2) ねじり 1 次振動数が曲げ 2 次振動数に非常に近いこと、が挙げられる。表より、ゴム支承の E_m を 100 倍とした場合の曲げ 1 次振動数の解析結果が、実験結果とほぼ一致することから、以後の解析は 100 倍として処理することとする。

図－5 には、解析結果の一例として曲げ 1 次振動モードとねじり 1 次振動モードを示している。また、図－6 には解析結果から得られた曲げ振動モードをそれぞれ実験結果と比較して示している。なお、図－6 において前述のように鉛直方向振動成分観測時に、断面中央部に配置した加速度計に不具合が生じたため、いずれの場合におい



(a) R1 加振時



(b) R2 加振時

図－4 鉛直方向加速度波形のフーリエスペクトル図

ても該当する箇所の実験値はないものとして図示している。同図より曲げ1次および2次モードは実験結果とほぼ一致したモード分布を示していることがわかる。しかしながら、3次モードにおいては若干のずれが生じていることがわかる。

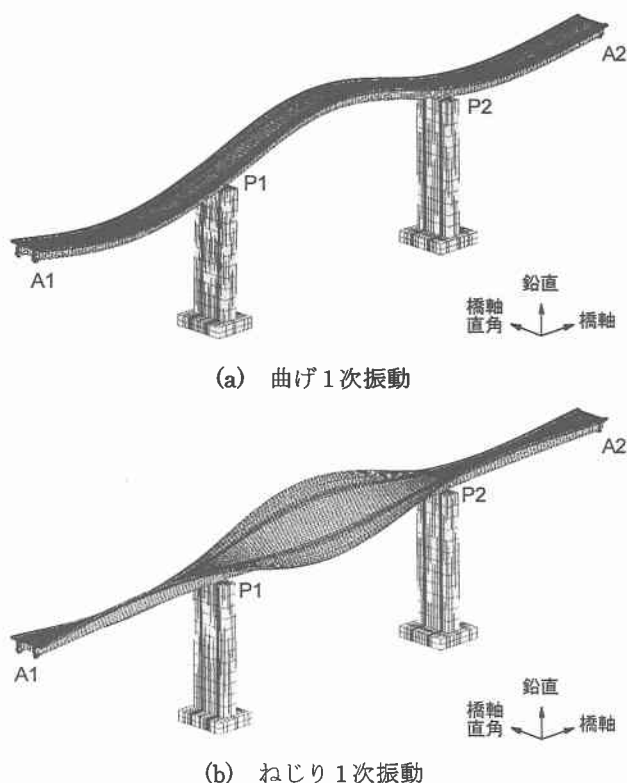
6. まとめ

つなぎ橋の今後の維持管理の観点から有限要素法による固有振動数解析を実施し、別途実施された人力加振実験結果と比較した。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) ゴム支承の弾性係数を設計値の100倍とすることにより実験結果の1次曲げ固有振動数を再現可能であることが明らかとなった。
- 2) 1次および2次の曲げ振動モードは実験結果とほぼ一致したモード分布を示すことが明らかとなった。

表－3 実験値および固有振動数解析結果との比較

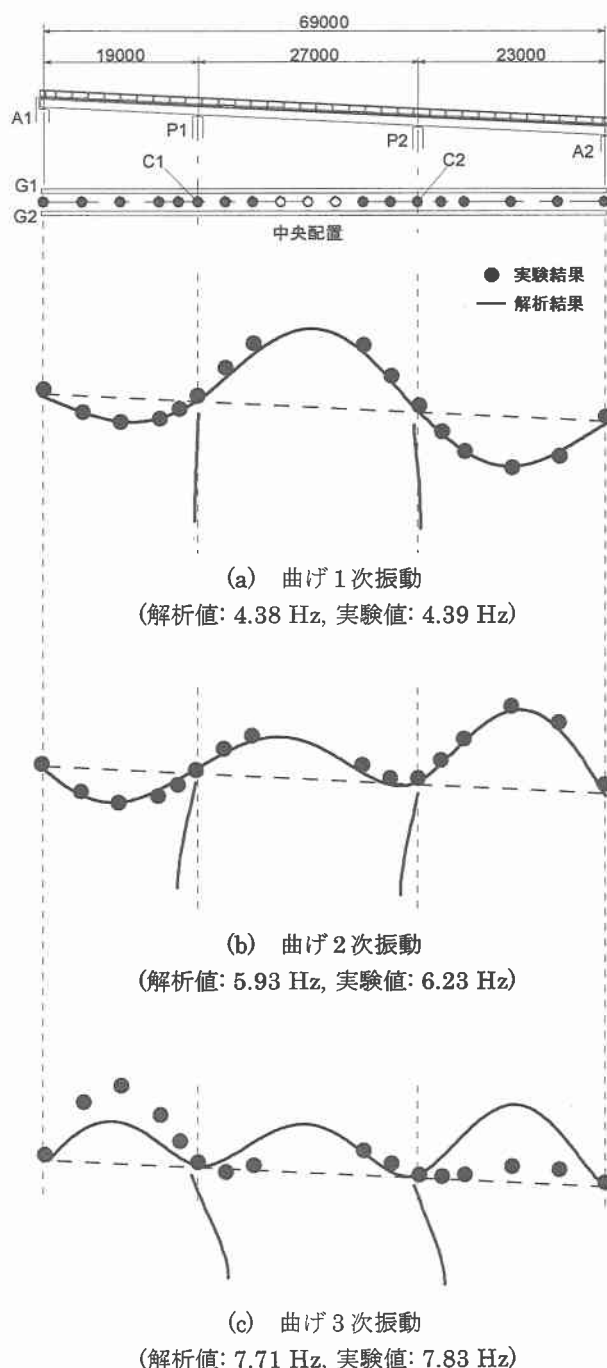
振動モード		実験値 (Hz)	解析値 (Hz)			
			$1.0E_m$	$50.0E_m$	$100.0E_m$	$200.0E_m$
曲げ振動	1次	4.39	3.80	4.21	4.38	4.56
	2次	6.23	5.55	5.59	5.93	6.16
	3次	7.83	7.46	6.73	7.71	8.49
ねじり振動	1次	—	5.75	5.69	5.82	5.93
	2次	—	6.50	6.70	7.08	7.31
	3次	—	8.12	7.49	7.77	8.00



図－5 次振動モード

【参考文献】

- 1) 薄木, 佐々木, 別所, 寺田: 坊中橋の製作・架設・鋼・集成材ハイブリッド木橋, 木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp5-10, 2001.
- 2) 岸, 寺田, 巽, 三上, 小室: 人力加振によるつなぎ橋の固有振動特性評価, 土木学会北海道支部論文集, Vol. 59.
- 3) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 2002.4.
- 4) 岸, 小室, 巽, 松本: 人力加振による鳥崎川公園歩道橋の固有振動特性評価, 土木学会北海道支部論文集, Vol. 58, pp181-191, 2002.1.



図－6 実験および解析結果におけるモード分布の比較